

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Локтионова Оксана Геннадьевна
Должность: проректор по учебной работе
Дата подписания: 11.10.2024 16:13:06
Уникальный программный ключ:
0b817ca911e6668abb13a5d426d39e5f1c11eabbf73e943df4a4851fda56d089

МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра нанотехнологий, микроэлектроники, общей и прикладной физики

УТВЕРЖДАЮ
Проректор по учебной работе
О.Г. Локтионова
« 9 » 10 2024 г.
(ЮЗГУ)



ФИЗИКА НАНОСИСТЕМ

Методические указания к выполнению лабораторных работ для
студентов направления подготовки
28.04.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника»

Курск 2024

УДК 544.72.023.221

Составители: Локтионова И.В., Ряполов П.А.

Рецензент

Доктор физико-математических наук, профессор А.П. Кузьменко

Физика наносистем: методические указания к выполнению лабораторных работ для студентов направления подготовки 28.04.01 «Нанотехнологии и микросистемная техника» / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: Локтионова И.В., Ряполов П.А. - Курск, 2024. - 49 с.

Излагаются методические указания к выполнению лабораторных работ, в которых изучаются осаждение пленок Ленгмюра-Блоджетт на цифровом двойнике, получения изотерм, изотерм «сжатия-растяжения» стеариновой кислоты на установке KSV NIMA, обработка АСМ скана ленгмюровской пленки с помощью ПО Gwyddion.

Методические указания соответствуют требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования и учебному плану направления подготовки 28.04.01 Нанотехнологии и микросистемная техника, степень (квалификация) магистр. Предназначены для студентов всех форм обучения.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 9.10.24 Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,33. Уч.- изд. л. 1,21. Тираж экз. Заказ 1113

Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.

305040, Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

СОДЕРЖАНИЕ

Теоретические сведения.....	4
Порядок работы с программным обеспечением KSV NIMA.....	11
Лабораторная работа №1 «Осаждение пленок Ленгмюра-Блоджетт с применением виртуальной модели установки KSV NIMA 2002».....	26
Лабораторная работа №2 «Получения изотерм сжатия стеариновой кислоты на установке KSV NIMA 2002».....	31
Лабораторная работа № 3 «Получения изотерм сжатия-растяжения стеариновой кислоты на установке KSV NIMA 2002».....	33
Лабораторная работа № 4 «Осаждения ленгмюровских пленок стеариновой кислоты»	36
Лабораторная работа № 5 «Обработка АСМ скана ленгмюровской пленки с помощью ПО Gwyddion».....	38
Рекомендуемая литература.....	49

Теоретические сведения.

Метод Ленгмюра-Блоджетт (ЛБ) является перспективным инструментом получения пленок с заданной молекулярной структурой и толщиной. Равномерное сжатие, нанесенного поверхностно-активного вещества (ПАВ) на поверхность жидкости (чаще всего на водную субфазу), приводит к образованию на границе раздела монослоя с двумерной молекулярной организацией (монослой Ленгмюра), при непосредственном последующем переносе которого на твердую поверхность формируется пленка Ленгмюра-Блоджетт.

Установка KSV NIMA 2002 внешнего вида, которой представлен на фотографии (рис. 1) позволяет, как получать пленки, так и контролировать процесс организации монослоя Ленгмюра.

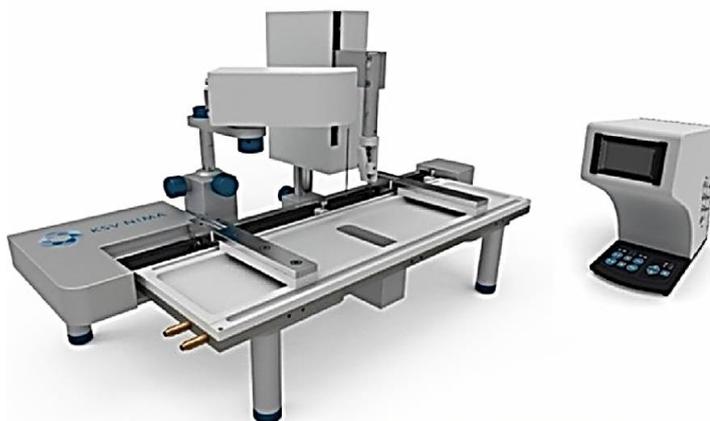


Рисунок 1. – Внешний вид установки KSV NIMA 2002

Основные узлы KSV NIMA 2002 и функциональные взаимосвязи между ними схематически изображены на рисунке 2.

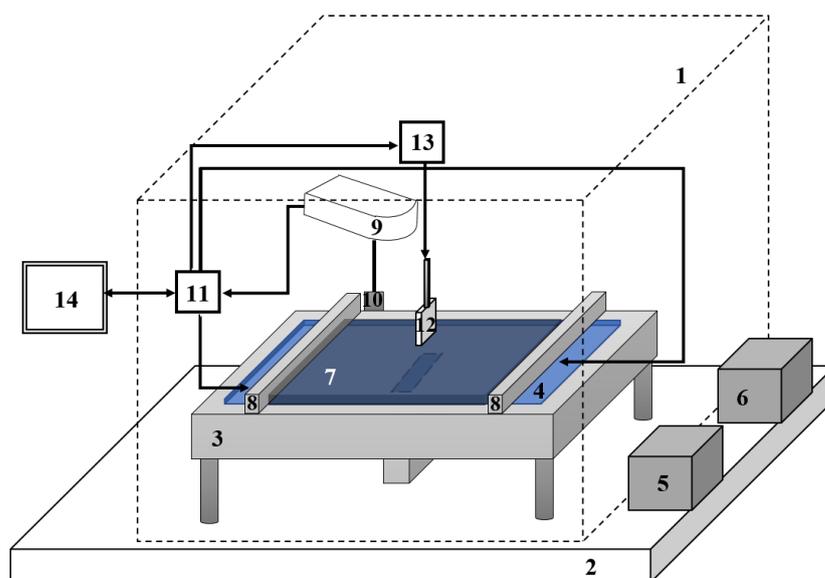


Рисунок 2. – Функциональная блок-схема установки KSV NIMA 2002:
 1 – защитный бокс; 2 – вибростол; 3 – ванна Ленгмюра; 4 – субфаза; 5 – насос; 6 – термостат; 7 – монослой Ленгмюра; 8 – подвижные барьеры; 9 – электронные весы Вильгельми; 10 – пластинка Вильгельми; 11 – блок управления; 12 – подложка; 13 – устройство перемещения подложки; 14 – компьютер

Под защитным боксом (1) на вибростоле (2) располагается двухсекционная симметричная фторопластовая ванна Ленгмюра (3). Ванна заполняется жидкой субфазой (4), поверхность которой, перед нанесением на нее ПАВ, очищается с помощью насоса (5). Термостатирование субфазы осуществляется циркуляцией воды по системе каналов под дном ванны с помощью термостата (6) JULABO F12-ED с диапазоном рабочих температур от -20 до $+100$ °C с точностью 0.03 °C. Монослой Ленгмюра (7) автоматически поджимается передвижными барьерами из полиацетала (8) со скоростью $0.1 - 270$ мм/мин. Поверхностное давление контролируется электронными весами Вильгельми (9) с точностью 4 мкН/м в диапазоне от 0 до 150 мН/м, к которым прикреплена пластинка Вильгельми (10). Блок управления (11) связан с двигателем перемещения барьеров и обеспечивает поддержание постоянным заданное поверхностное давление в процессе переноса монослоя на твердую подложку (12). Процесс переноса

осуществляется механизмом погружения – диппером (13). Закрепленная в диппер твердая подложка, медленно опускается и поднимается сквозь поверхность монослоя со скоростью 0.1 – 100 мм/мин. Управление процессом осаждения пленок осуществляется с помощью компьютера (14).

ПАВ, имеющее амфифильное строение с полярной гидрофильной «головой» и длинным углеводородным «хвостом», наносится с помощью микрошприца по каплям на предварительно очищенную поверхность субфазы. Чистка поверхности производится с помощью насоса, который удаляет тонкий поверхностный слой субфазы до тех пор, пока значение поверхностного давления при полном открытии и закрытии барьеров не изменится менее, чем на 0.2-0.3 мН/м. После очистки уровень жидкости должен быть вровень с краями ванны или чуть выше. Нанесенное ПАВ самопроизвольно распределяется на границе раздела воздух-вода. Полярная группа обладает большим сродством к полярной фазе и втягивается в воду, а углеводородный радикал выталкивается наружу, при этом происходит уменьшение энергии Гиббса: $dG^s = -S^s dT + VdP^s + \sigma_0 ds^s + \sum \mu_i^s dn_i^s$, где S^s – энтропия, V – объем, P^s – давление, σ_0 – поверхностное натяжение, s^s – площадь поверхности раздела фаз, μ^s – химический потенциал, n^s – количество вещества. Таким образом, удается ограничить толщину поверхностного слоя диаметром одной молекулы и сформировать стабильный мономолекулярный слой на поверхности жидкости.

Стоит отметить, что твердое органическое вещество перед нанесением на поверхность необходимо растворить в легколетучем растворителе. Растекаясь по поверхности субфазы, растворитель испаряется, а оставшийся ПАВ равномерно поджимается барьерами до образования монослоя Ленгмюра, состоящего из плотноупакованных и строго упорядоченных молекул.

Изотермическая зависимость поверхностного давления (π) от удельной молекулярной площади (A) для монослоя коллоидной системы (КС) приведена на рисунке 3, которая содержит информацию, как о

межмолекулярных взаимодействиях, так и о переориентации, конформации, перестройках и других процессах, характеризующих поведение сложной молекулы на поверхности воды.

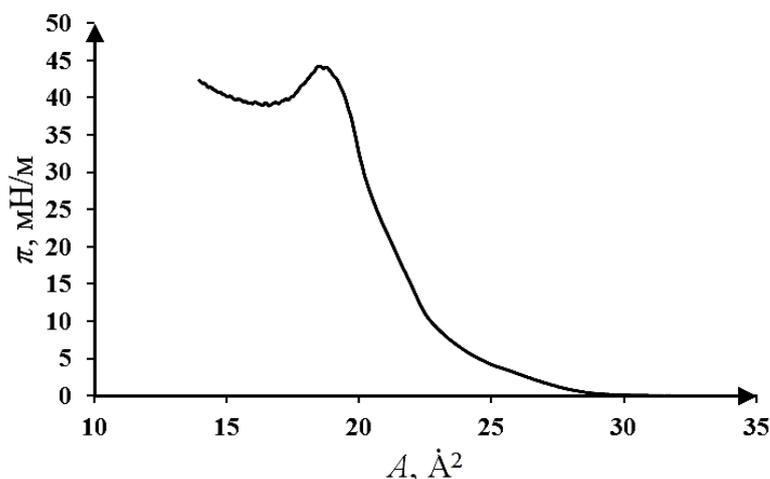


Рисунок 3. – π - A изотерма стабилизированного нитрида бора

Поверхностное давление рассчитывается с учетом изменений поверхностного натяжения чистой субфазы (σ_0) и монослоя КС ВаTiO₃/H₂O (σ):

$$\pi = \sigma - \sigma_0. \quad (1)$$

Поверхностное натяжение измеряется весами Вильгельми с точностью 0.1 мкН/м. На пластину Вильгельми (прямоугольная пластина из стекла, слюды, кварца, платины или кусочек фильтровальной бумаги) с длиной – a' , шириной – b' , толщиной – c' и плотностью материала ρ , погруженную на глубину $h_{ж}$ в жидкость с плотностью $\rho_{ж}$ действует сила тяжести $F_{тяж} = \rho g a' b' c'$, сила Архимеда $F_{арх} = \rho_{ж} g h_{ж} b' c'$ и сила поверхностного натяжения $F' = \sigma_0 (b' + c') (\cos \gamma)$. Результирующая сила, действующая на пластину, направлена вниз и равна: $F'' = \rho g a' b' c' + 2 \sigma_0 (b' + c') (\cos \gamma) - \rho_{ж} g h_{ж} b' c'$, где g – ускорение свободного падения, γ – контактный угол между жидкостью и пластинкой Вильгельми. При $\cos \gamma = 1$ пластинка смачивается и поверхностное давление (1) записывается в виде: $\pi = -(\Delta F') / (2b') = -\Delta m g / 2b'$, если $b' \gg c'$ где m – масса пластины. В установке применяется прецизионный датчик для измерения линейных перемещений пластинки

Вильгельми, сигнал с которого через дифференциальный трансформатор подается на вход АЦП. Напряжение на выходе весов Вильгельми оказывается линейно связанным с поверхностным давлением π (рисунок 4) и за счет обратной связи через АЦП управляет как перемещениями барьеров, так и режимом опускания и подъема пластинки Вильгельми.

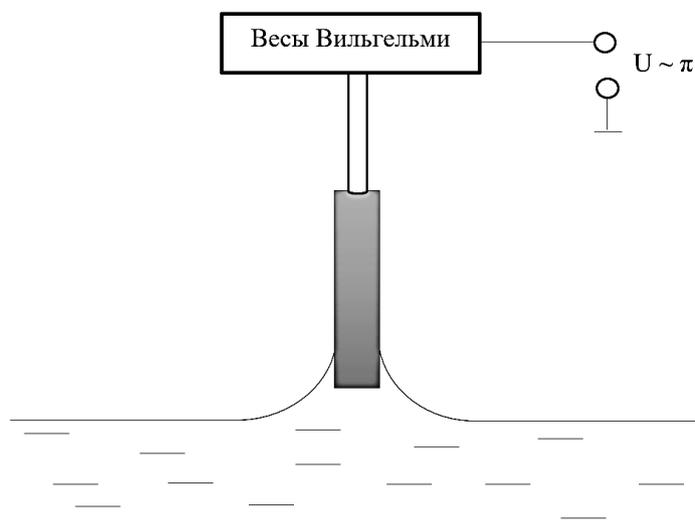


Рисунок 4. – Измерение поверхностного натяжения пластинкой Вильгельми

Прямо пропорциональная зависимость координат подвижного барьера, измеренных по падению напряжения линейного реостата, позволяет определять площадь формируемого монослоя A .

Форма π - A изотермы для монослоев сильно зависит от расположения молекул в нем (рисунок 5). В начальный момент сжатия монослой Ленгмюра находится в «газообразном» состоянии (рисунок 5, а), частицы располагаются далеко друг от друга и не взаимодействуют между собой, удовлетворяя уравнению: $\pi A = kT$. При дальнейшем сближении барьеров межмолекулярное расстояние уменьшается, и монослой переходит в «жидкую» (рисунок 5, б), затем в «твердую» (рисунок 5, в) фазы. Дальнейшее сжатие монослоя в твердом состоянии приводит к коллапсу, молекулы ПАВ покидают границу раздела, монослой Ленгмюра превращается в подсубфазную и/или надмонослойную трехмерную систему.

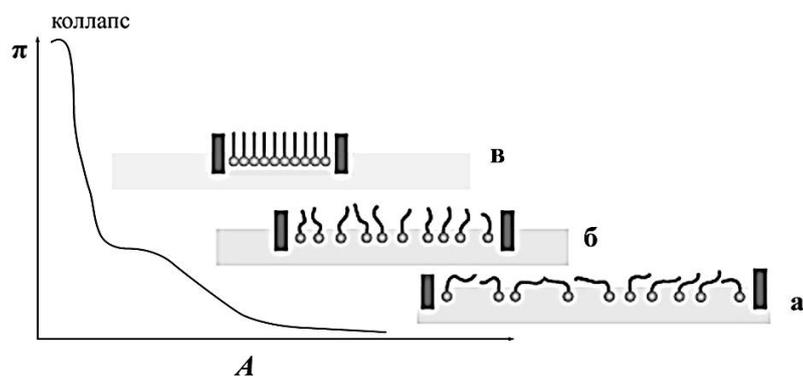


Рисунок 5. – Фазовые превращения в монослое Ленгмюра: газообразное – а; жидкое – б; твердокристаллическое – в

Переходы между фазами на π - A изотермах отображаются в виде плато. Экстраполяция линейных участков зависимости π - A на ось A , соответствующих сжатию монослоя в различных фазовых состояниях, дает величину площади, приходящуюся на одну молекулу – A_0 . Ее величина определяется посредством измерения площади поверхности – S , занятой монослоем (площадь ванны) и поверхностной концентрацией молекул – n' : $A = S/n'$ где $n' = (N_A m' P') / (100M)$, здесь N_A – число Авогадро; m' – количество нанесенного раствора в граммах; P' – весовая концентрация вещества в растворе; M – молекулярный вес используемого вещества.

По π - A изотерме также определяется давление – π переноса монослоя с поверхности субфазы на твердую подложку, которое лежит в диапазоне «сжатая жидкость» - «твердое тело» (рисунок 5, б, в).

Перенос самоорганизованного монослоя с жидкой поверхности на твердую подложку осуществляется двумя методами. Метод вертикального лифта (метод Ленгмюра-Блоджетт, рисунок 6, а) заключается в осаждении монослоя на подложку, погружая и поднимая ее через сформировавшийся монослой. Для гидрофильных подложек процесс переноса следует начинать поднятием ее из субфазы, при этом нанесенное число слоев будет нечетное. Четное число слоев наносится на гидрофобные подложки, процесс переноса которых начинается опусканием в субфазу. Нарращивание пленки горизонтальным лифтом (метод Ленгмюра–Шеффера, рисунок 6, б)

происходит многократным горизонтальным касанием подложки поверхности монослоя, который за счет сил адгезии прикрепляется к ней.

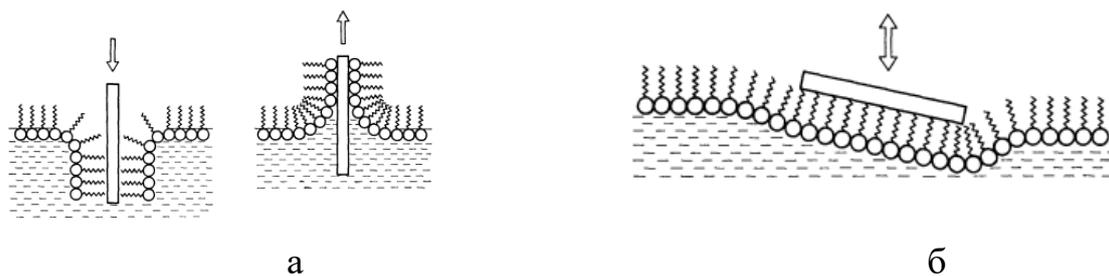


Рисунок 6. – Методы осаждения пленок: вертикальный лифт – а;
горизонтальный лифт – б

АСМ изображения пленок стабилизированного титаната бария, осажденных на платиновые подложки горизонтальным (рисунок 7, а) и вертикальным (рисунок 7, б) методами значительно различаются. Пленки, полученные горизонтальным лифтом, имеют явные несплошности, пленки же Ленгмюра-Блоджетт имеют регулярную плотноупакованную структуру.

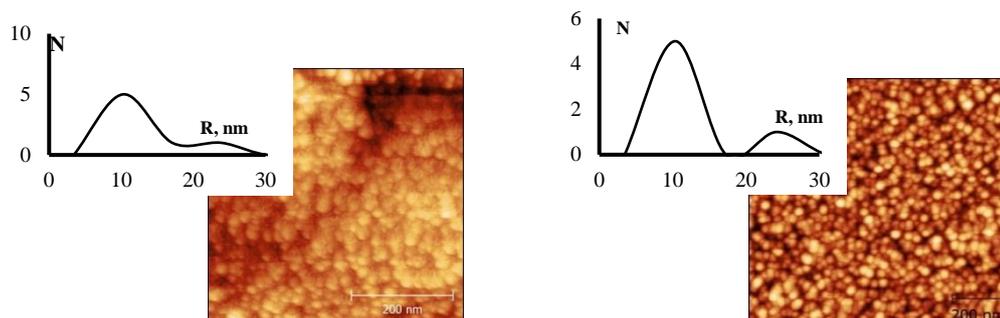


Рисунок 7. – АСМ изображения пленки из КС $\text{BaTiO}_3/\text{H}_2\text{O}$:
горизонтальный лифт – а; вертикальный лифт – б

Степень покрытия подложки монослоем характеризуется коэффициентом переноса – $k_{\text{пер}}$:

$$k_{\text{пер}} = (S' - S'')/S_{\text{п}} \quad (2)$$

где S' и S'' площадь монослоя Ленгмюра в момент начала и после окончания переноса, $S_{\text{п}}$ – площадь подложки. Коэффициент переноса при нормальном осаждении пленки варьируется в пределах 0.8 – 1.2. Микроскопические неоднородности подложки приводят к многослойному нанесению пленки за

один проход, при этом $k_{пер} > 1$. Если пленка десорбируется от подложки в субфазу $k_{пер} < 1$, такие пленки имеют несплошную структуру.

Порядок работы с программным обеспечением KSV NIMA

В главном окне программного обеспечения **KSV Win LB** выберите основное меню  **Main Menu** и запустите **KSV LB control software**. В меню открывшегося окна **LB Control Software** (рис. 8).

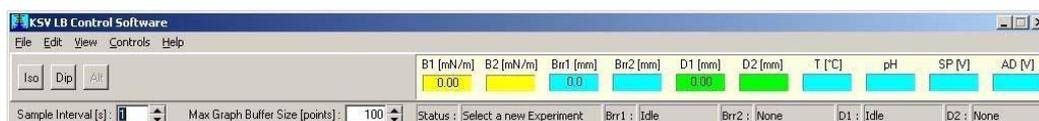


Рисунок 8. – Окно основного меню

выберите **Edit** → **Device Parameters** (рис.9):

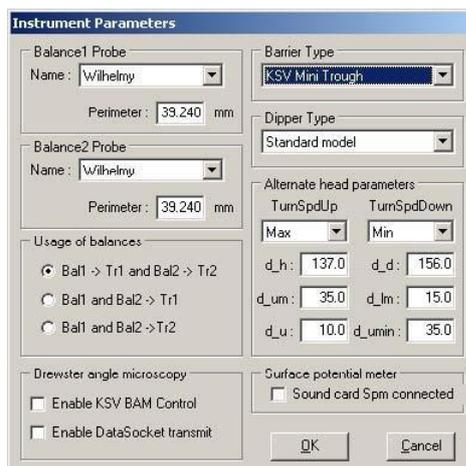


Рисунок 9. – Окно параметров устройства

Barrier и **Dipper Type** выберите соответствующие модели установки – **KSV 2000**. В графе **Balance1 Probe** выберите использование пластинки Вильгельми для определения поверхностного давления – **Wilhelmy**. Т.к. в работе используется с одним датчиком поверхностного давления, то в разделе **Usage of Balances** следует отметить строку **Bal1 -> Tr1 and Bal2 -> Tr2**. Остальные установки остаются без изменений. Нажмите **Ok**.

Откройте окно управления **Manual Control Unit** (рис.10) и на закладке управления барьерами **Barrier page** нажмите **Open** (если окно **Manual Control Unit** не активно, то откройте его **Main Menu** → **Control Panel**).

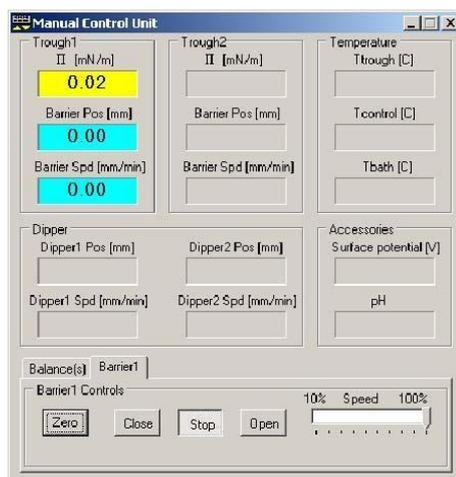


Рисунок 10. – Окно ручного управления

Барьеры должны переместиться к краям ванны, т.е. «открыться».

Измерьте расстояние между барьерами и ширину ванны настолько точно, насколько это возможно (точность измерений должна быть не хуже 0,5мм) и вычислите эффективную площадь ванны в мм². Перейдите в раздел базы данных **Edit** → **Database** в окне **LB Control Software** и выберите строку **Troughs**, проверьте соответствует ли вычисленная эффективная площадь ванны указанной величине в базе данных. В противном случае измените значение эффективной площади на полученное вами. После внесенных изменений нажмите значок для проверки изменений.

Получение изотермы сжатия монослоя HSt

С помощью **Manual Control Unit** разведите **Open** барьеры в крайнее положение. Налейте в ванну деионизованную воду так, чтобы образовался «высокий» мениск. Устройством очистки удалите как можно более тонкий поверхностный слой субфазы возле барьеров. Полностью сведите **Close** барьеры и повторите очистку поверхности субфазы. Повторите процедуру 2-3 раза. Критерием чистоты поверхности субфазы служит тот факт, что значение поверхностного давления при полном открытии и закрытии барьеров не должно изменяться более, чем на 0.2-0.3 мН/м.

После очистки поверхности субфазы уровень жидкости должен быть вровень с краями ванны или чуть выше. Разведите барьеры к

краям ванны, т.е. на нулевую позицию.

Очистите пластинку Вильгельми в хромовой смеси и деионизованной воде и повесьте ее на крючок датчика поверхностного давления (весы Вильгельми).

В окне **Manual Control Unit** установите нулевые точки отсчета барьера (кнопка **Zero**, закладка **Barrier**) и датчика поверхностного давления (кнопка **Zero**, закладка **Balance**).

Наберите микрошприцем или микропипеткой рассчитанный объем раствора стеариновой кислоты и малыми каплями, как можно ближе к поверхности, нанесите раствор на всю поверхность субфазы. При этом значение поверхностного давления может кратковременно измениться на 0.5 мН/м.

Пока растворитель испаряется можно заполнить данные эксперимента. В окне **KSV LB Control Software** нажмите кнопку **ISO** (рис.11).



Рисунок 11. – Окно, управляющее программное обеспечение

В открывшемся окне **Experimental Setup** внесите необходимые данные, как указано на представленном ниже рисунке (рис.12):

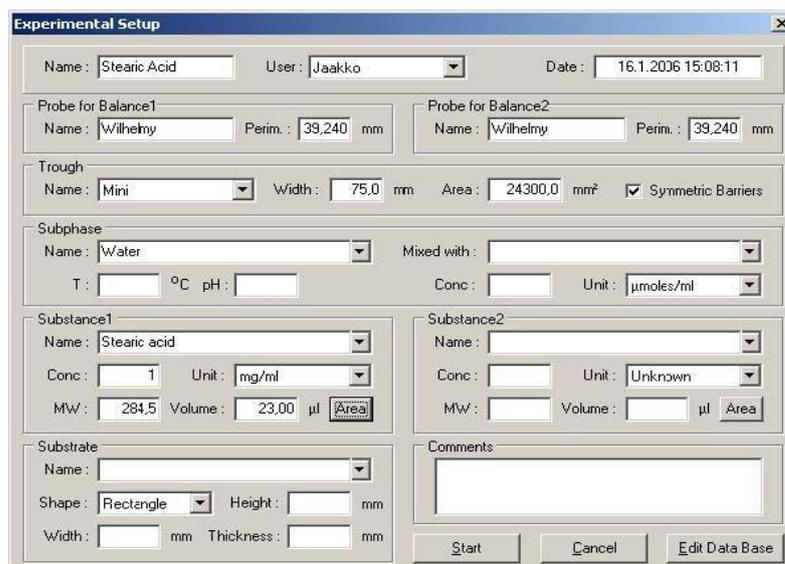


Рисунок 12. – Окно экспериментальная установка

Кнопка **Area** в разделе **Substance** служит для проверки начального значения площади, приходящейся на молекулу.

После внесения данных в окне **Experimental Setup** нажмите кнопку **Start**. Нажатие этой кнопки не приведет к началу процесса, а откроются окна **Trough Controls** и **Trough Isotherm Data**, представленные ниже (рис. 13).

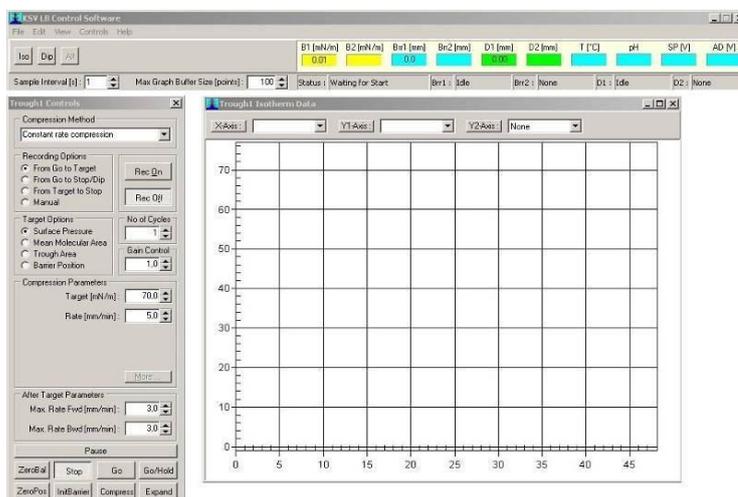


Рисунок 13. – Окно элементы управления сжатием и данные об изотерме сжатия

Установите параметры в окне **Trough Controls**, как показано на рисунке выше. В поле **Target** выберите **Surface pressure** и установите в поле **Compression Parameters** значение поверхностного давления как можно

большим. В графе **Rate** установите скорость сжатия монослоя – 10 мм/мин.

После испарения растворителя (15-20 минут) нажмите кнопки **Rec On** и **GO** в окне **Trough Controls**. В окне **Trough Isotherm Data** будет отображаться график изотермы сжатия. Статус в окне **KSV LB Control Software** изменится с **Waiting for Start** на **Running** (рис. 14). Параметры **Compression Parameters** в окне **Trough Controls** могут быть изменены в ходе процесса, внесенные изменения будут учтены немедленно.

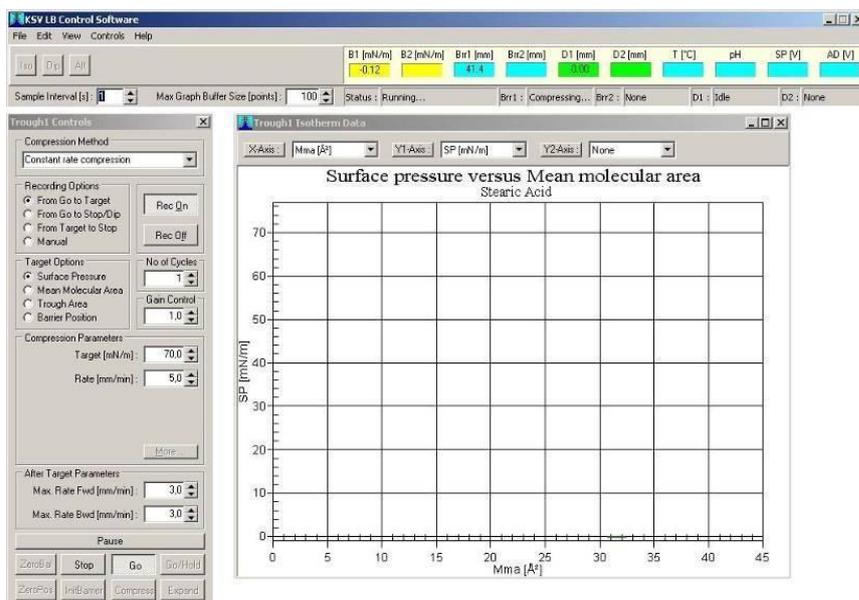


Рисунок 14. – Окно данные об изотерме сжатия

Масштаб осей и отображаемая величина могут быть изменены в окне **Trough Isotherm Data** в полях **XAxis** и **YAxis**.

После разрушения монослоя – коллапса – нажмите **STOP** в окне **Trough Controls**. Для монослоя стеариновой кислоты на чистой воде значение давления коллапса приблизительно 60 мН/м (рис. 15).

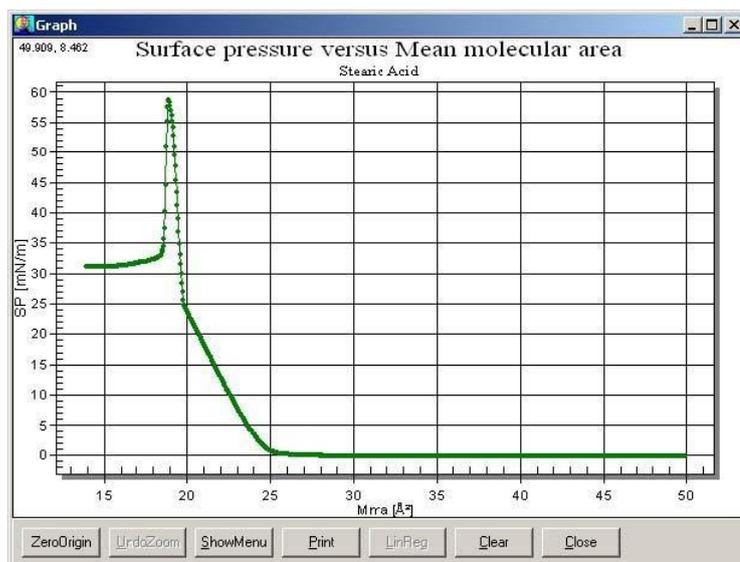


Рисунок 15. – Окно π - A изотермы

После нажатия **STOP** появится диалоговое окно сохранения данных (рис. 16).



Рисунок 16. – Окно сохранения данных

Нажмите **YES**. После нажатия на кнопку **YES** остановится процесс регистрации данных, в противном случае процесс остановится автоматически после достижения барьерами ограничителя, который перед началом процесса нужно установить так, чтобы движению барьера не мешала пластинка Вильгельми.

Сохраненные данные помещены в базу данных, откуда извлечь

их для анализа можно при помощи кнопки  **Browse LB Experiment** в **Main Menu** (рис.17).



Рисунок 17. – Окно просмотра экспериментальных данных

В открывшемся окне выберите сохраненную изотерму сжатия и нажмите правую кнопку мыши для доступа к меню. В появившемся меню выберите **Graph**, предварительно изменив значение поля **X-axis** на **Mma [Å²]** (рис. 18).

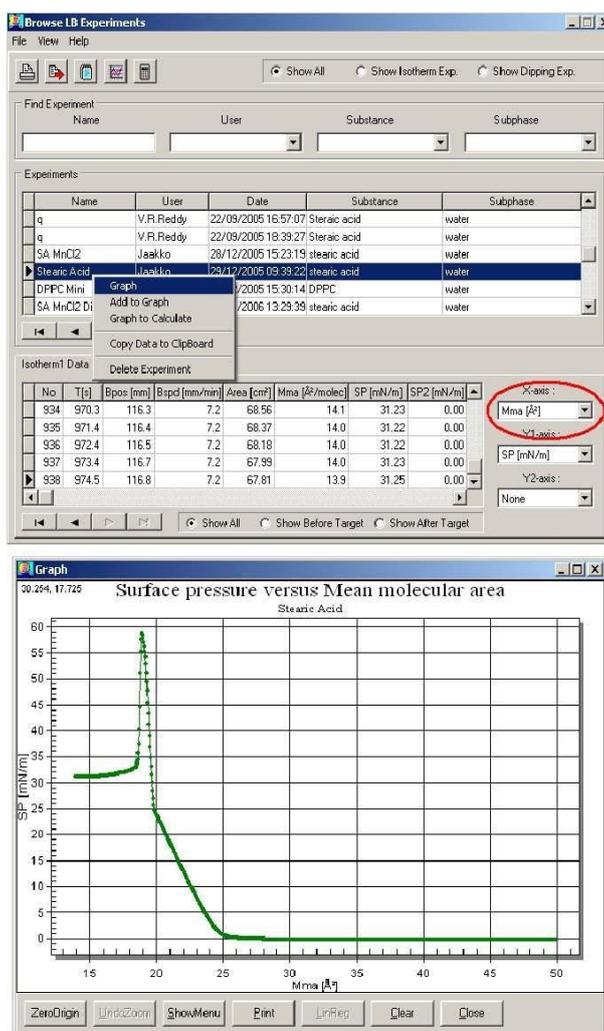


Рисунок 18. – Окно построения графиков

На полученной изотерме сжатия стеариновой кислоты на поверхности чистой воды можно выделить три области:

- Площадь на молекулу $> 30 \text{ \AA}^2$. Состояние монослоя соответствует газообразному, т.е. расстояния между молекулами велики, а межмолекулярное взаимодействие можно уподобить газообразному состоянию объемного вещества.

- Площадь на молекулу $20\text{-}30 \text{ \AA}^2$. Расстояние между молекулами уменьшается и возрастает взаимодействие. На данном участке состояние монослоя можно описать, как жидкая фаза объемного вещества.

- Площадь на молекулу $> 20 \text{ \AA}^2$. Молекулы в монослое имеют плотную упаковку, сжимаемость монослоя соответствует значению сжимаемости твердого вещества. Экстраполируя линейный участок изотермы, соответствующий твердому состоянию монослоя, до значения поверхностного давления 0 мН/м , получим величину площади, приходящейся на молекулу в монослое – $20 \pm 1 \text{ \AA}^2/\text{molecule}$.

После проведения эксперимента очистите поверхность субфазы и удалите воду из ванны при помощи устройства очистки. Перед проведением нового эксперимента повторите все этапы подготовки и очистки.

Получение пленок Ленгмюра-Блоджетт на твердой подложке.

Наносимый на поверхность субфазы состав представляет собой раствор HSt в легколетучем растворителе гексане. Рассчитайте необходимый объем раствора так, чтобы после его нанесения на поверхность субфазы, он должен растечься с образованием мономолекулярного слоя.

Залейте в ванну дистиллированную воду таким образом, чтобы поверхность субфазы была на несколько миллиметров выше краев ванны. Дождитесь пока температура субфазы стабилизируется. Используя **Manual Control Unit** сведите барьеры к центру ванны и устройством очистки очистите поверхность субфазы между барьерами (рис. 19). Затем вновь откройте барьеры и повторите очистку. Процедуру повторите два-три раза.

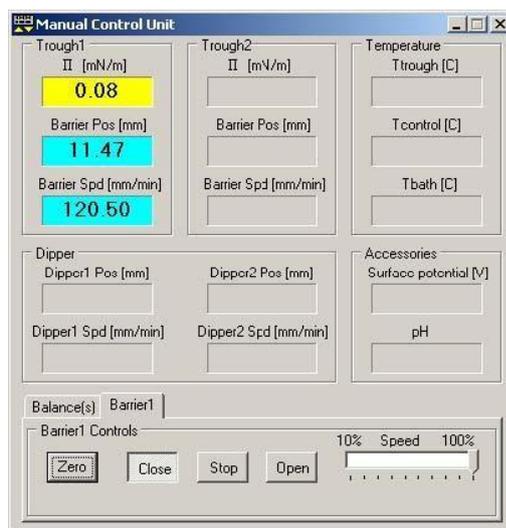


Рисунок 19. – Окно ручного управления

При последнем закрытии барьеров очищайте поверхность субфазы до тех пор, пока уровень жидкости не станет на незначительную величину выше или не сравняется с краями ванны. Затем откройте барьеры полностью, т.е. поставьте их в нулевую позицию, как указано на рисунке ниже.

Протрите пластинку Вильгельми чистым этанолом и деионизованной водой. Повесьте пластинку на крючок датчика давления таким образом, чтобы две ее трети были над уровнем поверхности субфазы.

Используя **Manual Control Unit** установите нулевые показания датчика поверхностного давления. Проверьте чистоту поверхности субфазы, сжав барьеры и наблюдая за изменениями показаний датчика поверхностно давления, величина которого не должна измениться более чем на 0.2-0.3 mN/m в процессе сжатия. Если величина поверхностного давления изменится более, чем на 0.3 mN/m, то нужно повторить очистку поверхности субфазы.

Очистите стеклянную пластинку, например хромовой смесью, погрузив в раствор на несколько минут. Затем удалите остатки хромовой смеси в деионизованной воде и просушите стеклянную пластинку.

Сухую стеклянную пластину закрепите в держателе-клипсе и установите его на подъемное устройство – dipper. При этом плоскость

поверхности стеклянной пластинки должна быть параллельна длинным сторонам барьеров.

С помощью **Manual Control Unit** опустите держатель со стеклянной пластинкой вниз так, чтобы край пластинки едва коснулся поверхности субфазы и сразу нажмите «stop».

В **Manual Control Unit** зафиксируйте эту позицию держателя, как нулевую. В дальнейшем не изменяйте значение нулевой позиции держателя, т.к. это приведет к искаженным вычислениям коэффициента переноса.

При помощи **Manual Control Unit** погрузите подложку в субфазу на глубину, например 10 мм (рис. 20). Эта часть подложки будет покрыта пленкой ЛБ

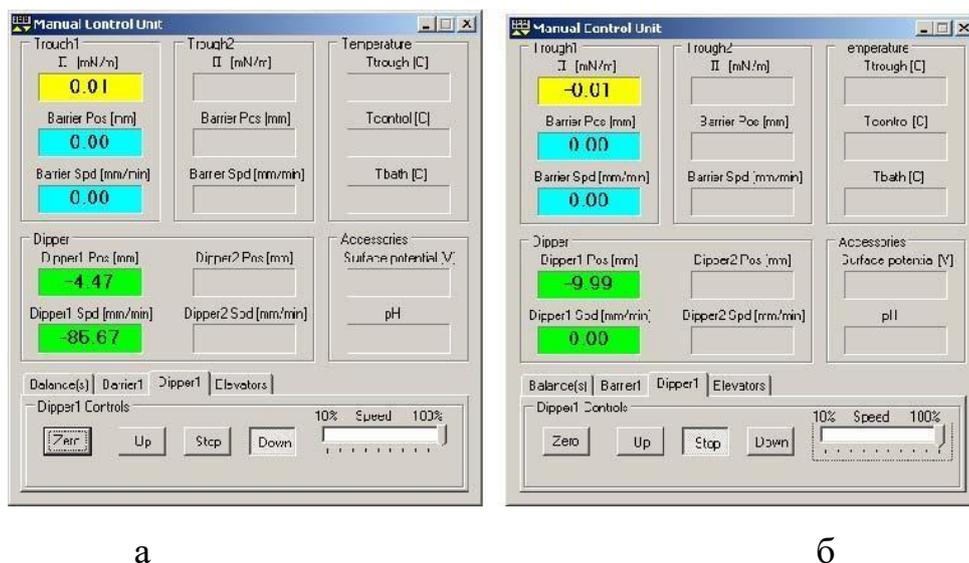


Рисунок 20. – Погружение подложки в субфазу перед процессом переноса (а)

Подложка на стартовой позиции для процесса переноса (б)

Очистите шприц, погрузив иглу в гексан или хлороформ и набрав и опустошив объем шприца 5-6 раз, или наденьте на микропипетку новый чистый наконечник. Встряхните емкость с раствором стеариновой кислоты. Наберите в шприц или микропипетку 25 μ l раствора HSt.

Перед нанесением раствора HSt на поверхность субфазы в **Manual Control Unit** установите нулевые значения показаний датчика поверхностного давления и положения барьеров.

Нанесите малыми каплями раствор HSt на всю поверхность субфазы не

касаясь ее. При этом значение поверхностного давления может кратковременно измениться на 0.5 мН/м. Дождитесь испарения растворителя (10 минут).

Пока растворитель испаряется в окне **KSV LB Control Software** нажмите кнопку **DIP** (рис. 21).

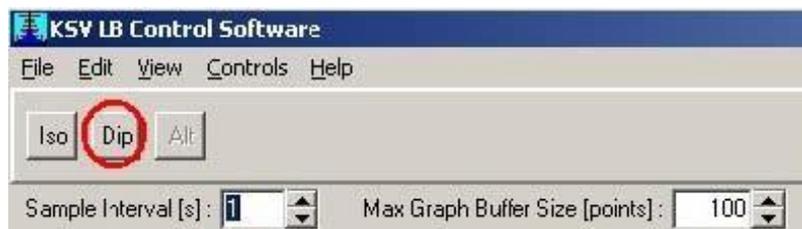


Рисунок 21. – Окно, управляющее программное обеспечение

Это позволит получить доступ к заполнению параметров переноса в **Experimental Setup**.

Заполните поля в форме **Experimental Setup** (рис. 22). Особо отмечены параметры, точность значений которых важны для получения корректных результатов измерений в процессе переноса:

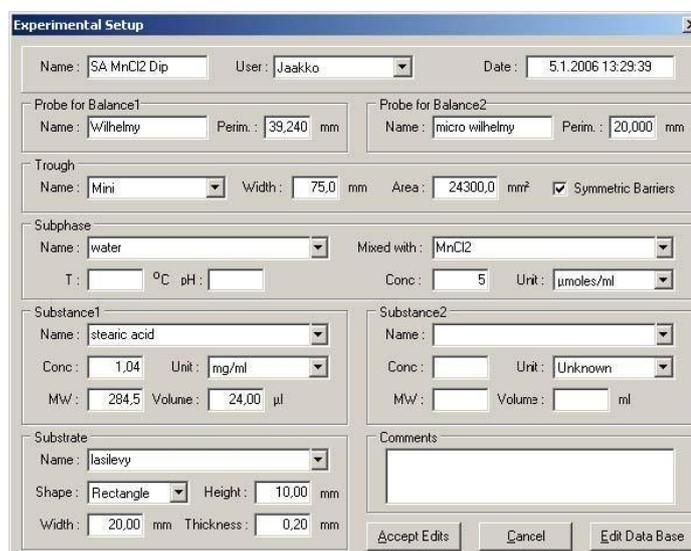


Рисунок 22. – Окно экспериментальная установка

В разделе **Substance1** нажмите кнопку **Area**, чтобы увидеть начальное значение эффективной площади, приходящейся на молекулу в монослое HSt (рис. 23):

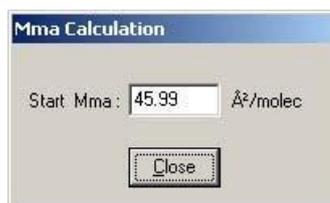


Рисунок 23. – Окно эффективная площадь

После заполнения требуемых полей в окне **Experimental Setup**, нажмите кнопку **Start**. Это не приведет к началу процесса переноса или процесса сжатия монослоя, но будут открыты окна **Trough Controls** и **Trough Isotherm Data**, как показано на рисунке 24.

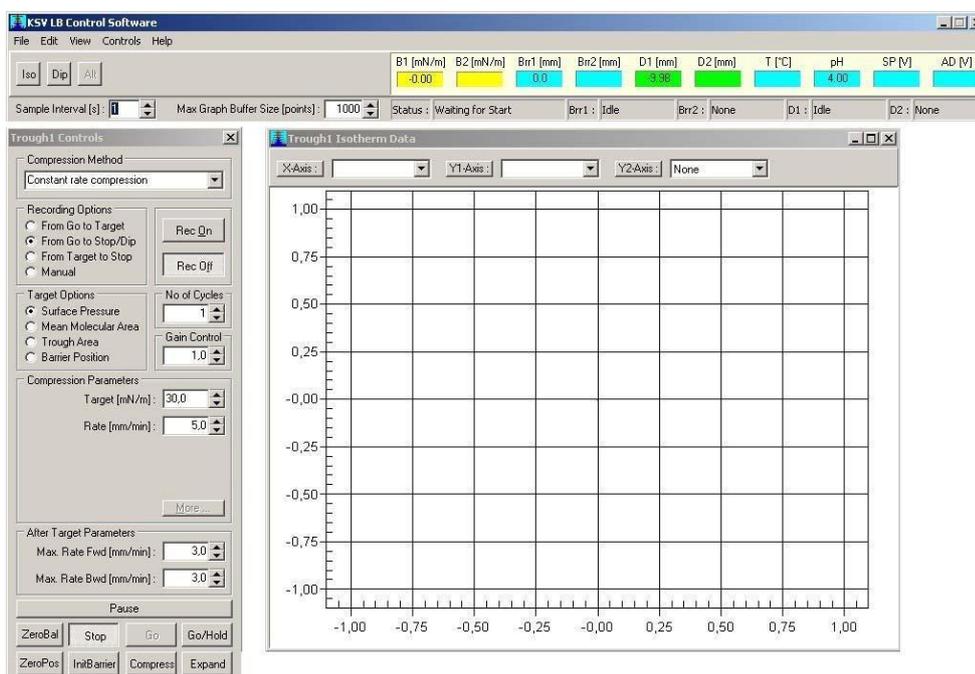


Рисунок 24. – Окно элементы управления сжатием и данные об изотерме сжатия

Установите параметры в окне **Trough Controls**, как показано на рисунке. В графе Rate установите скорость сжатия монослоя – 10 мм/мин.

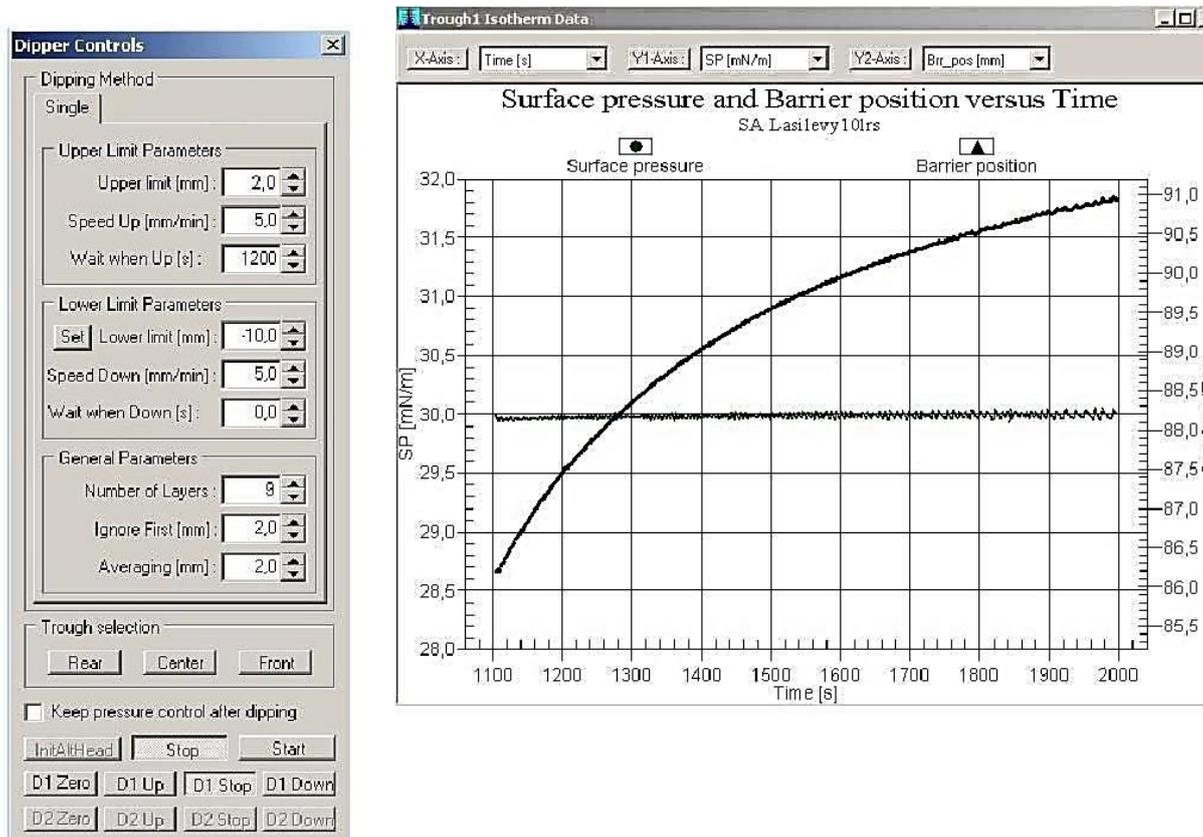
Значение поверхностного давления, при котором переносится монослой, уже определено - 30 mN/m.

После испарения растворителя нажмите кнопку **GO/HOLD** в окне **Trough Controls**. После этого все кнопки в окне **Trough Controls** будут неактивны, за исключением кнопки **STOP** и начнется процесс сжатия монослоя. В окне **Trough Isotherm Data** будет отображаться график изотермы сжатия. Статус в окне **KSV LB Control Software** изменится с

Waiting for Start на **Running**. Параметры **Compression Parameters** в окне **Trough Controls** могут быть изменены в ходе процесса, внесенные изменения будут учтены немедленно.

Когда давление в монослое достигнет установленного значения, окно **Trough Controls** автоматически закроется и появится окно **Dipper Controls**. На представленном графике будут отображены зависимости поверхностного давления и положения барьера, как функции времени.

Необходимо дождаться когда монослой стабилизируется, т.е. выдержать монослой при давлении переноса в течении 10-20 минут. В течении этого времени нужно ввести значения параметров в окне **Dipper Controls**, как показано на рисунке 25.



a

б

Рисунок 25. – Окно элементы управления диппером (а); окно стабилизации монослоя (б)

Установка параметров погружения (Lower Limit Parameters).

В случае использования гидрофильной подложки определенная

ранее глубина погружения (высота подложки) устанавливается нажатием кнопки «set», расположенной рядом с полем значения «Lower Limit». Если используется гидрофобная подложка, то перед началом процесс переноса необходимо ввести глубину погружения подложки в миллиметрах.

Установка параметров поднятия (Upper Limit Parameters).

В поле «upper limit» необходимо ввести значение 2 мм для того, чтобы при поднятии подложка оторвалась от границы раздела фаз субфаза-воздух на время сушки. Если подложка будет иметь контакт с границей раздела, то перенесенный монослой не высохнет полностью и это может привести к его сползанию с поверхности подложки при следующем цикле переноса.

Обычно скорость движения подложки при переносе монослоя составляет 5- 10 mm/min, что обеспечивает достаточное качество переноса.

После стабилизации монослоя в течении 10 минут нажмите кнопку **Start** в окне **Dipper Controls** (рис. 26).

В процессе переноса стеклянная подложка будет подниматься из субфазы, а установленное значение поверхностного давления будет поддерживаться постоянно автоматически. В ходе процесса переноса изменение поверхностного давления и коэффициента переноса, как функции времени, отображается на графических зависимостях.

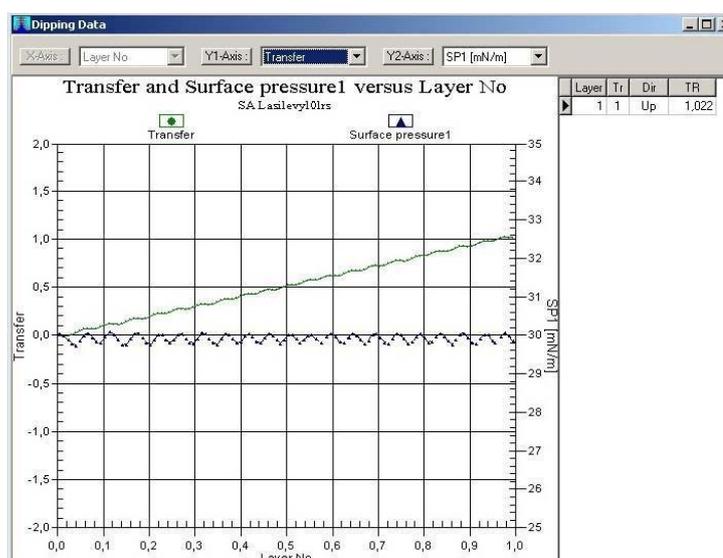


Рисунок 26. – Окно осаждения

После осаждения первого монослоя на панели справа будет показан вычисленный коэффициент переноса, а стеклянная пластинка находится неподвижно в воздухе для сушки. Для удовлетворительной сушки перед следующим циклом переноса достаточно 15- 20 минут.

После переноса всех слоев, указанных в окне **Dipper Controls**, процесс переноса автоматически остановится и появится **Main Menu**. В правой части окна **Dipping Data** отображен список, в котором указано значение коэффициента переноса для каждого осажденного монослоя.

После проведения эксперимента очистите поверхность субфазы и удалите воду из ванны при помощи устройства очистки. Снимите пластинку Вильгельми и очистите ее деионизованной водой и чистым этанолом и поместите на хранение в емкость с водорастворимым органическим растворителем. После удаления субфазы из ванны, снимите барьеры и очистите ванну и барьеры согласно инструкции.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1
ОСАЖДЕНИЕ ПЛЕНОК ЛЕНГМЮРА-БЛОДЖЕТТ С
ПРИМЕНЕНИЕМ ВИРТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ УСТАНОВКИ KSV
NIMA 2002

Цель работы: получение навыков работы на установке осаждения пленок Ленгмюра -Блоджетт с применением цифрового двойника.

Оборудование: цифровой двойник прибора KSV NIMA.

Ход работы:

- 1) Включаем блок питания (рис. 1).

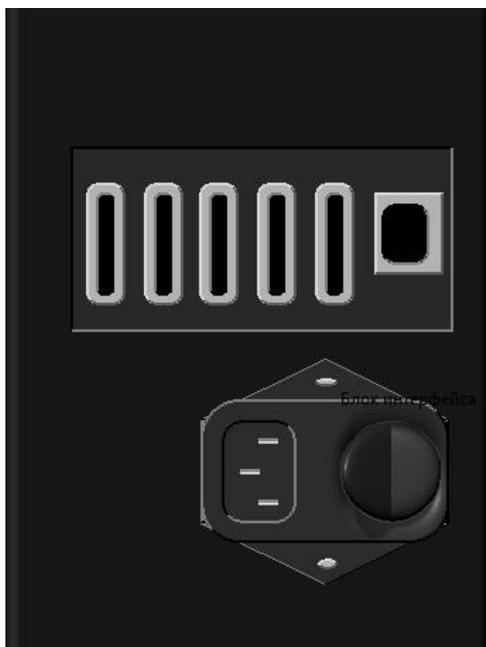


Рисунок 1.– Окно блок питания

- 2) Откройте окно программы, в разделе *Barrier Type* выберите *KSV mini Through*, в *Dipper type – Standard model*, в разделе *Balance1 Probe – Wilhelmy*. В разделе *Usage of Balances* отметьте строку *Ball-Tr1 and Bal2-Tr2* (рис.2).

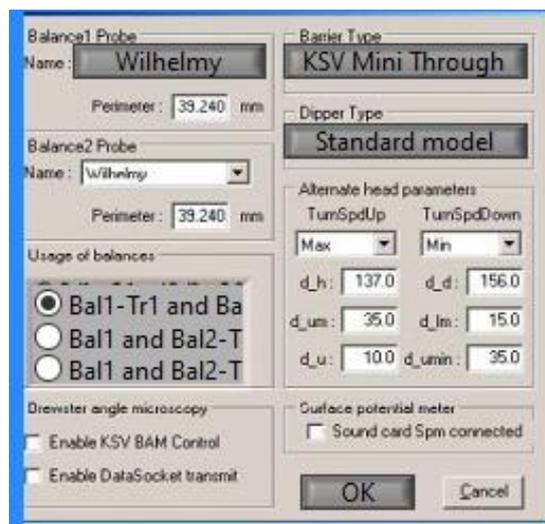


Рисунок 2. – Окно программы

3) Нажмите на кнопку *open* (рис. 3).

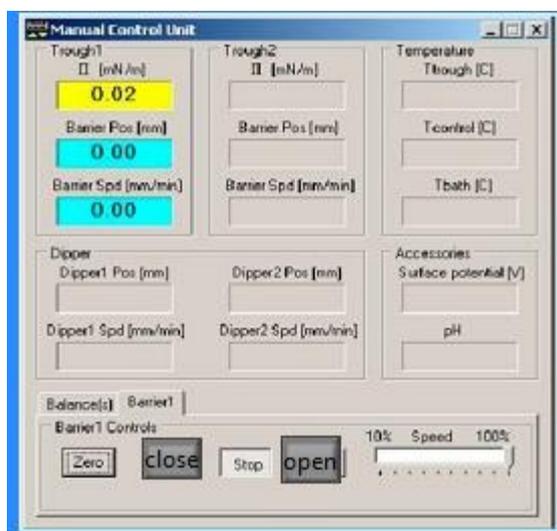


Рисунок 3. – Окно ручного управления

4) Налейте в ванну дистиллированную воду, устройством очистки удалите как можно более тонкий поверхностный слой субфазы возле барьеров, нанесите по каплям коллоидный раствор (рис. 4).

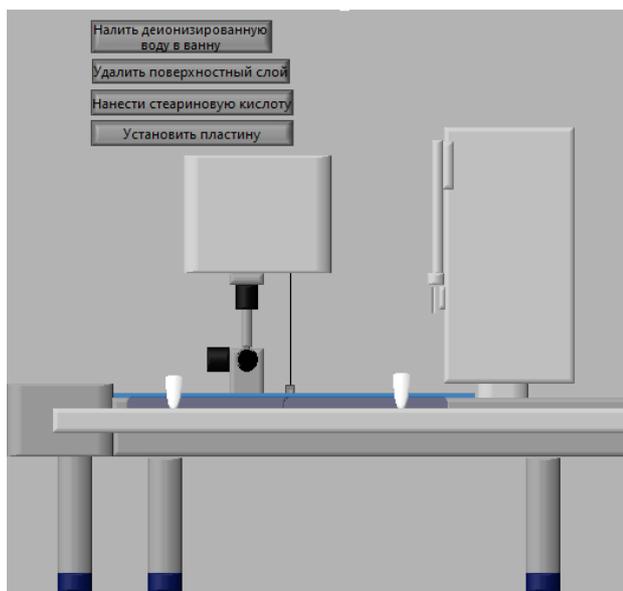


Рисунок 4. – Окно манипуляции с ванной

5) Нажмите на кнопку *ISO* для начала формирования изотермы (рис. 5)

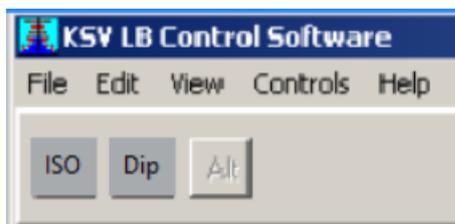


Рисунок 5. – Окно, управляющее программное обеспечение

6) Введите названия наносимого вещества, его молярную массу, объем, нажмите на *Area* для определения площади соответствующий одной молекуле (рис. 6)

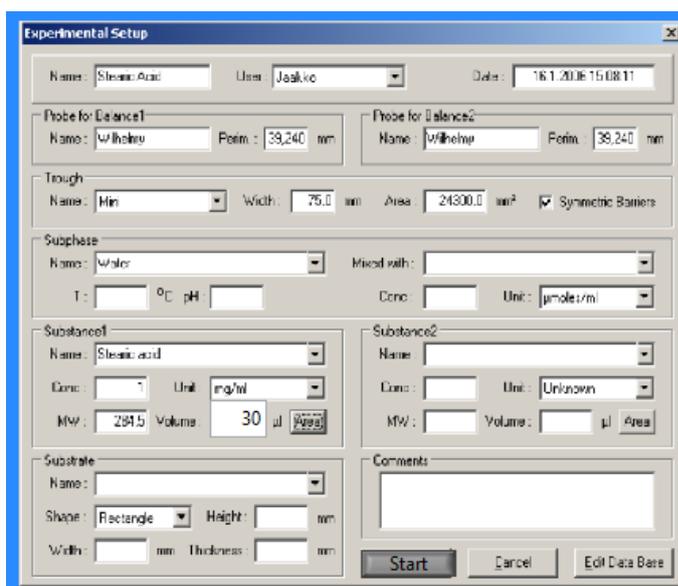


Рисунок 6. – Окно экспериментальная установка

7) Определите по полученной изотерме:

- фазовые состояния;
- площади приходящиеся на молекулу в монослое, полученные экстраполяцией линейного участка на ось A , в различных фазовых состояниях;
- давление переноса.

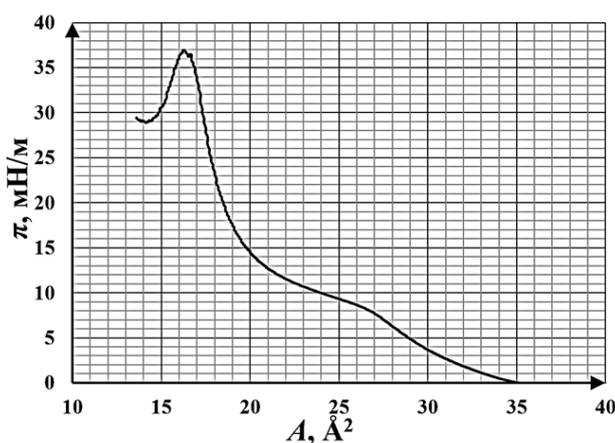


Рисунок 7. – Изотерма стабилизированного нитрида бора

8) Слейте воду и промойте ванну согласно инструкции.

9) Повторите пункт 4.

10) Нажмите на кнопку *Dip* начала нанесения пленки на подложку (рис.

8)

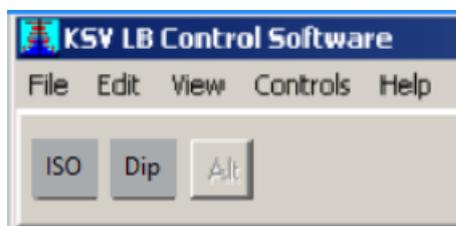


Рисунок 8. – Окно, управляющее программное обеспечение

11) Опустите пластинку до соприкосновения с поверхностью с помощью панели ручного управления (рис. 9).

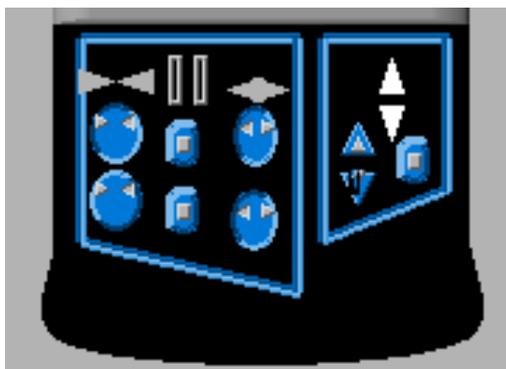


Рисунок 9. – Окно ручного управления

12) Осадите пленку.

13) Сформулируйте вывод.

Контрольные вопросы:

1. Основные принципы метода Ленгмюра-Блоджетт?
2. Основные узлы установки KSV NIMA 2002?
3. Назначение пластинки Вильгельми?
4. Фазовые превращения на π -A изотерме?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2

ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОТЕРМ СЖАТИЯ СТЕАРИНОВОЙ КИСЛОТЫ НА УСТАНОВКЕ KSV NIMA 2002

Цель работы: получить и исследовать изотермическую зависимость поверхностного давления от площади для стеариновой кислоты.

Оборудования: установка KSV NIMA 2002, стеариновая кислота, гексан, дистиллированная вода, пробирки.

Ход работы:

- 1) Подготовьте ванну для проведения эксперимента.
- 2) Налейте в ванну дистиллированную воду так, чтобы образовался «высокий» мениск. Устройством очистки удалите как можно более тонкий поверхностный слой субфазы возле барьеров.
- 3) Повесьте пластинку Вильгельми на крючок датчика поверхностного давления (весы Вильгельми).
- 4) В окне *Manual Control Unit* установите нулевые точки отсчета барьера (кнопка *Zero*, закладка *Barrier*) и датчика поверхностного давления (кнопка *Zero*, закладка *Balance*).
- 5) Наберите микрошприцем 25 мкл раствора стеариновой кислоты и малыми каплями, как можно ближе к поверхности, нанесите раствор на всю поверхность субфазы. Дождитесь испарения растворителя (10 минут).
- 6) Пока растворитель испаряется, заполните данные эксперимента. В окне *KSV LB Control Software* нажав кнопку *ISO*.
- 7) После внесения данных в окне *Experimental Setup* нажмите кнопку *Start*. Заполните данные в открывшихся окнах *Trough Controls* и *Trough Isotherm Data*.
- 8) В поле *Compression Parameters* установите значение поверхностного давления как можно большим. В графе *Rate* установите скорость сжатия монослоя – 10 мм/мин.
- 9) После испарения растворителя (15-20 минут) нажмите кнопки *Rec*

On и *GO* в окне *Trough Controls*. В окне *Trough Isotherm Data* будет отображаться график изотермы сжатия. Статус в окне *KSV LB Control Software* изменится с *Waiting for Start* на *Running*. Параметры *Compression Parameters* в окне *Trough Controls* могут быть изменены в ходе процесса, внесенные изменения будут учтены немедленно

10) После разрушения монослоя нажмите *STOP* в окне *Trough Controls*.

11) Сохраненные данные извлеките нажатием *Browse LB Experiment* в *Main Menu*. В открывшемся окне выберите сохраненную изотерму сжатия и нажмите правую кнопку мыши для доступа к меню. В появившемся меню выберите *Graph*, предварительно изменив значение поля *X-axis* на *Mma [A²]*.

12) Удалите воду из ванны при помощи устройства очистки, снимите барьеры и очистите ванну, барьеры и пластинку Вильгельми согласно инструкции.

13) Постройте график зависимости π (*A*) в excel.

14) По π (*A*) изотерме определите:

- фазовые состояния;
- площадью приходящейся на молекулу в монослое, полученной экстраполяцией линейного участка на ось *A*, в различных фазовых состояниях;
- давление переноса.

15) Сформулируйте вывод.

Контрольные вопросы:

1. Фазовые превращения на π -*A* изотерме?
2. Какую информацию содержит изотермическая зависимость поверхностного давления (π) от удельной молекулярной площади (*A*)?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

ПОЛУЧЕНИЯ ИЗОТЕРМ СЖАТИЯ-РАСТЯЖЕНИЯ СТЕАРИНОВОЙ КИСЛОТЫ НА УСТАНОВКЕ KSV NIMA 2002

Цель работы: получить и исследовать изотермы «сжатия - растяжения» стеариновой кислоты.

Оборудования: установка KSV NIMA 2002, стеариновая кислота, гексан, дистиллированная вода, пробирки.

Ход работы:

- 1) Подготовьте ванну для проведения эксперимента
- 2) Налейте в ванну дистиллированную воду так, чтобы образовался «высокий» мениск. Устройством очистки удалите как можно более тонкий поверхностный слой субфазы возле барьеров.
- 3) Повесьте пластинку Вильгельми на крючок датчика поверхностного давления (весы Вильгельми).
- 4) В окне *Manual Control Unit* установите нулевые точки отсчета барьера (кнопка *Zero*, закладка *Barrier*) и датчика поверхностного давления (кнопка *Zero*, закладка *Balance*).
- 5) Наберите микрошприцем 25 мкл раствора стеариновой кислоты и малыми каплями, как можно ближе к поверхности, нанесите раствор на всю поверхность субфазы. Дождитесь испарения растворителя (10 минут).
- 6) Пока растворитель испаряется, заполните данные эксперимента. В окне *KSV LB Control Software* нажав кнопку *ISO*.
- 7) После внесения данных в окне *Experimental Setup* нажмите кнопку *Start*. Заполните данные в открывшихся окнах *Trough Controls* и *Trough Isotherm Data*.
- 8) В поле *Compression Parameters* установите значение поверхностного давления как можно большим. В графе *Rate* установите скорость сжатия монослоя – 10 мм/мин. В поле *No of Cycles* установите 2 цикла (рисунок 1).

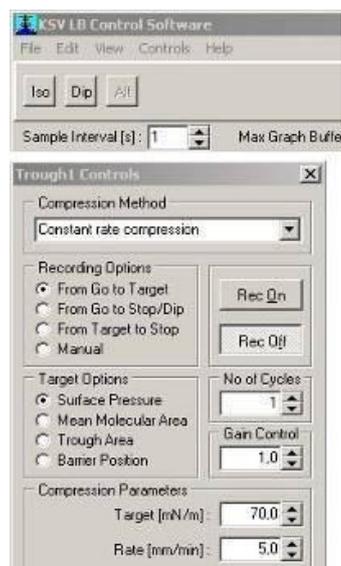


Рисунок 1. – Изменения циклов сжатия-растяжения

9) После испарения растворителя (15-20 минут) нажмите кнопки *Rec On* и *GO* в окне *Trough Controls*. В окне *Trough Isotherm Data* будет отображаться график изотермы сжатия. Статус в окне *KSV LB Control Software* изменится с *Waiting for Start* на *Running*. Параметры *Compression Parameters* в окне *Trough Controls* могут быть изменены в ходе процесса, внесенные изменения будут учтены немедленно.

10) После разрушения монослоя нажмите *STOP* в окне *Trough Controls*.

11) Сохраненные данные извлеките нажатием *Browse LB Experiment* в *Main Menu*. В открывшемся окне выберите сохраненную изотерму сжатия и нажмите правую кнопку мыши для доступа к меню. В появившемся меню выберите *Graph*, предварительно изменив значение поля *X-axis* на $Mma [A^2]$.

12) Удалите воду из ванны при помощи устройства очистки, снимите барьеры и очистите ванну, барьеры и пластинку Вильгельми согласно инструкции.

13) Постройте изотерму сжатия-растяжения зависимости π (A) в excel

14) В скольких точках пересекаются изотермы, о чем это свидетельствует?

15) С чем связана причина сдвига второго хода π (A) изотерм сжатия-растяжения?

16) Как изменилась площадь, приходящаяся на молекулу в монослое при сжатии и растяжении?

17) Сформулируйте вывод.

Контрольные вопросы:

1. Какую информацию содержит изотермическая зависимость π (A) сжатия-растяжения?
2. Точки пересечения прямого и обратного хода?
3. Площадь петли изотерм сжатия-растяжения?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

ОСАЖДЕНИЯ ЛЕНГМЮРОВСКИХ ПЛЕНОК СТЕАРИНОВОЙ КИСЛОТЫ

Цель работы: осаждение пленки стеариновой кислоты методом Ленгмюра-Блоджетт.

Оборудования: установка KSV NIMA 2002, стеариновая кислота, гексан, дистиллированная вода, стеклянная подложка, пробирки.

Ход работы:

- 1) Подготовьте ванну для проведения эксперимента
- 2) Налейте в ванну дистиллированную воду так, чтобы образовался «высокий» мениск. Устройством очистки удалите как можно более тонкий поверхностный слой субфазы возле барьеров.
- 3) Повесьте пластинку Вильгельми на крючок датчика поверхностного давления (весы Вильгельми).
- 4) В окне *Manual Control Unit* установите нулевые точки отсчета барьера (кнопка *Zero*, закладка *Barrier*) и датчика поверхностного давления (кнопка *Zero*, закладка *Balance*).
- 5) Наберите микрошприцем 25 мкл раствора стеариновой кислоты и малыми каплями, как можно ближе к поверхности, нанесите раствор на всю поверхность субфазы. Дождитесь испарения растворителя (10 минут).
- 6) Пока растворитель испаряется, заполните данные эксперимента. В окне *KSV LB Control Software* нажав кнопку *DIP*.
- 7) После внесения данных в окне *Experimental Setup* нажмите кнопку *Start*. Заполните данные в открывшихся окнах *Trough Controls*.
- 8) В поле *Compression Parameters* установите значение поверхностного давления 30 мН/м. В графе *Rate* установите скорость сжатия монослоя – 10 мм/мин.
- 9) После испарения растворителя (15-20 минут) нажмите кнопку *GO/HOLD*. В окне *Trough Isotherm Data* будет отображаться график изотермы сжатия. Статус в окне *KSV LB Control Software* изменится с *Waiting*

for Start на *Running*. Параметры *Compression Parameters* в окне *Trough Controls* могут быть изменены в ходе процесса, внесенные изменения будут учтены немедленно

10) Когда давление в монослое достигнет установленного значения, окно *Trough Controls* автоматически закроется и появится окно *Dipper Controls*, заполните его.

11) Дождитесь стабилизации монослоя (10-20 минут).

12) Нажмите кнопку *Start* в окне *Dipper Controls*.

13) После переноса всех слоев, указанных в окне *Dipper Controls*, процесс переноса автоматически остановится и появится *Main Menu*. В правой части окна *Dipping Data* отображен список, в котором указано значение коэффициента переноса для каждого осажденного монослоя.

14) Удалите воду из ванны при помощи устройства очистки, снимите барьеры и очистите ванну, барьеры и пластинку Вильгельми согласно инструкции.

15) Запишите коэффициенты переноса пленки на твердую подложку, их физический смысл.

16) Сформулируйте вывод.

Контрольные вопросы:

- 1) Пленки X,Z,Y типа амфифильных веществ?
- 2) Зависимость выбора способа переноса пленки от типа подложки?
- 3) Горизонтальные и вертикальные лифты осаждения пленок?
- 4) Физический смысл коэффициента переноса?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

ОБРАБОТКА АСМ СКАНА ЛЕНГМЮРОВСКОЙ ПЛЕНКИ С ПОМОЩЬЮ ПО GWYDDION

Цель работы: освоить обработку сканов и построение графиков в ПО Gwyddion.

Оборудование: ПО Gwyddion

Теоретические сведения.

Одним из информативных методов исследования ленгмюровских пленок является сканирующая-зондовая микроскопия, анализ данных которой осуществляется с помощью модульной программы- Gwyddion. В первую очередь она предназначена для анализа полей высот, полученных различными техниками сканирующей зондовой микроскопии (АСМ, МСМ, СТМ, СБОМ), но в общем случае её можно использовать для анализа любых полей высот или (монохромных) изображений, например для анализа данных профилометрии или карт толщины, построенных картирующей спектrophотометрией.

Окно инструментов содержит набор меню Gwyddion и несколько строк с кнопками, связанными с обычными функциями и инструментами. В меню функции сгруппированы следующим образом (рис.1):

Файл

объединяет команды, которые используются для загрузки и сохранения файлов. Некоторые из глобальных команд (например, *Выход*) также расположены здесь. История недавно открытых файлов может просматриваться командой *Файл* → *Последние файлы* → *Предыдущие документы*.

Правка

предоставляет команды управления историей редактирования (*Отменить*, *Повторить*) и редакторы для различных глобальных ресурсов, таких как градиенты и материалы для представления данных

в шкале псевдоцвета и трёхмерном виде или цвета по умолчанию, используемого для масок.

Обработка данных

автоматически строится из всех модулей обработки данных, расположенных в каталоге module установки Gwyddion (зависит от операционной системы). Это меню вместе с панелью кнопок *Инструменты* содержит большую часть команд, которые могут понадобиться для анализа данных СЗМ. Подмножество этих функций также доступно на панели кнопок *Обработка данных*. Эти кнопки служат кнопками быстрого запуска часто используемых функций из одноимённого меню. Все функции, доступные на этой панели, также можно найти и в меню.

График

подобен *Обработке данных*, за исключением того, что состоит из функций для работы с графиками. Обработка графиков включает в себя аппроксимацию функциями, экспорт данных графиков и т.п. Панель кнопок *График* снова содержит подмножество наиболее часто используемых функций меню *График*.

Объёмные данные

подобно функциям *Обработки данных*, за исключением того, что содержит функции работы с объёмными данными.

Данные XYZ

подобно функциям *Обработки данных*, за исключением того, что содержит функции работы с данными XYZ.

Карты кривых

подобно функциям *Обработки данных*, за исключением того, что содержит функции работы с данными карт кривых.

Информация

содержит команды, которые представляют вспомогательную информацию о Gwyddion, такие как версия программы и список

загруженных модулей вместе с содержащимися в них функциями.

Также там находится команда включения браузера данных.

И, наконец, можно найти в главном окне несколько рядов кнопок. Кнопки в панели *Вид* предоставляют различные функции масштабирования (которые чаще проще вызвать с помощью комбинации клавиш или просто изменяя размер окна данных) и представления данных в трёхмерном виде. Панели *Обработка данных* и *График* содержат избранные функции из меню *Обработка данных* и *График*, описанные выше.

Панель *Инструменты* содержит инструменты, т.е. функции, которые напрямую работают с выбранным в окне данных. Эти функции доступны только с этой панели кнопок.

Группы кнопок в панели инструментов можно менять используя меню *Правка* → *Панель инструментов*, вплоть до полного удаления отдельных групп и создания абсолютно новых.

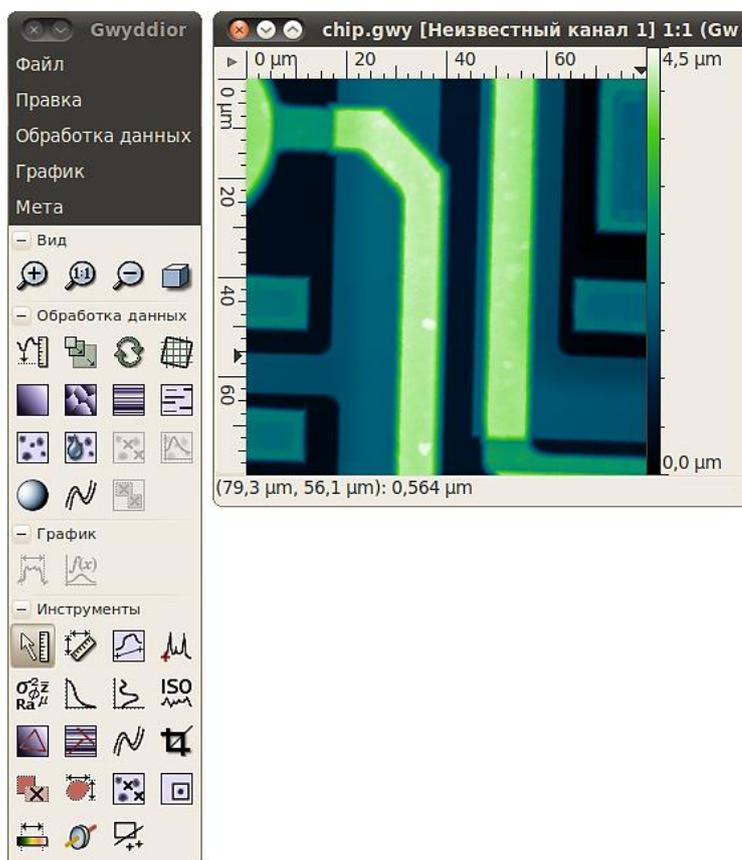


Рисунок 1. – Главное окно и окно данных, показывающее поверхность микросхемы

Ход работы:

1) После запуска программы, появится главное меню редактирования (рис.2).

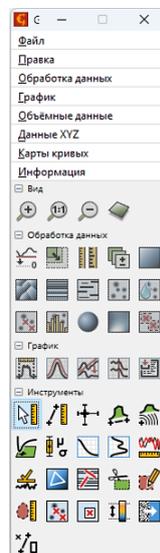


Рисунок 2. – Окно редактирования

2) Для открытия файла необходимо воспользоваться меню *Файл*→*Открыть* (горячие клавиши Ctrl+O) (рис.3).

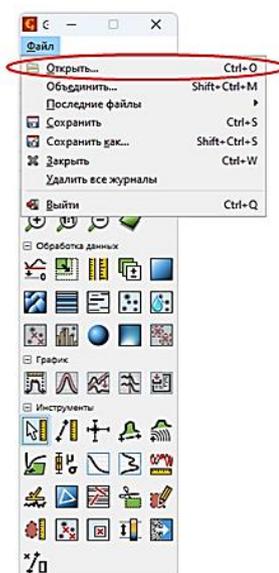


Рисунок 3. – Окно открытия файла

3) После этого первое изображение откроется в новом окне в черно-белом представлении (рис.4).

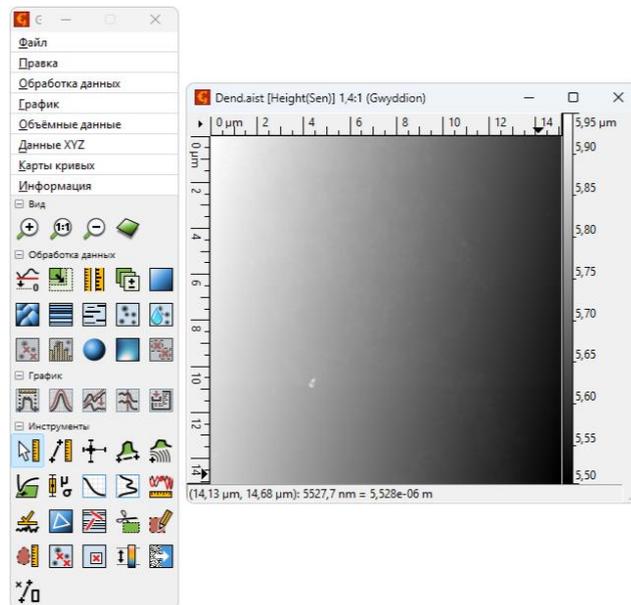


Рисунок 4. – Окно открытия изображения

4) Для просмотра всех изображений, содержащихся в файле необходимо воспользоваться командой *Информация→Показать браузер данных*, он откроется в новом окне (рис.5).

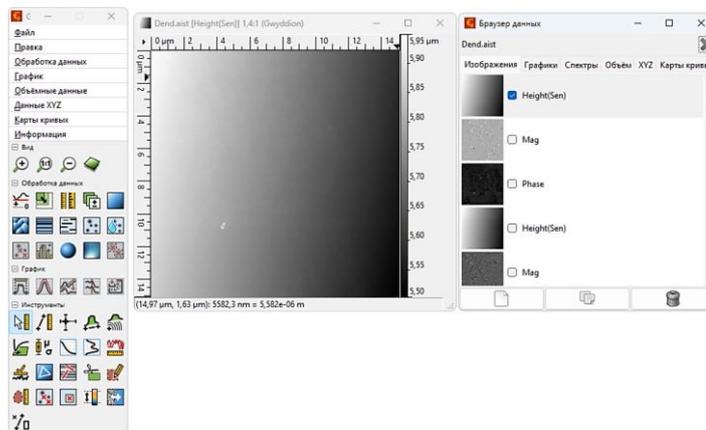
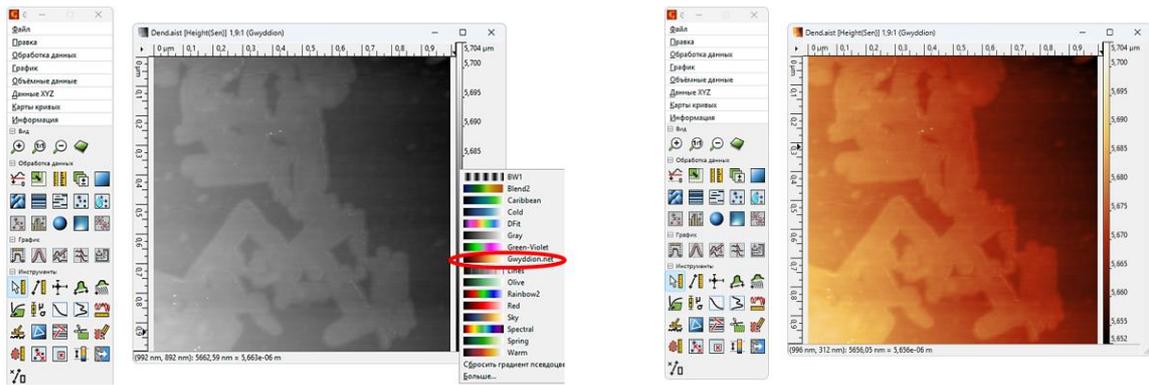


Рисунок 5. – Окно просмотра всех изображений

С помощью прокрутки выберете необходимое изображение и поставьте галочку в чекбоксе рядом с ним, кликнув левой клавишей мыши. В новом окне появится выбранное изображение. Первое, при этом, можно закрыть.

5) Для придания цветного вида изображению, кликните правой клавишей мыши на шкале высоты (рис. 6, а).



а

б

Рисунок 6. – Окно обработки изображения

Выберите цветовую схему, наиболее подходящую для изображения (обычно это Gwyddion.net) (рис. 6, б).

б) Затем произведите обработку изображение с помощью команд в главном меню редактирования.

Вырывание данных вычитанием средней плоскости изображения (рис.7).

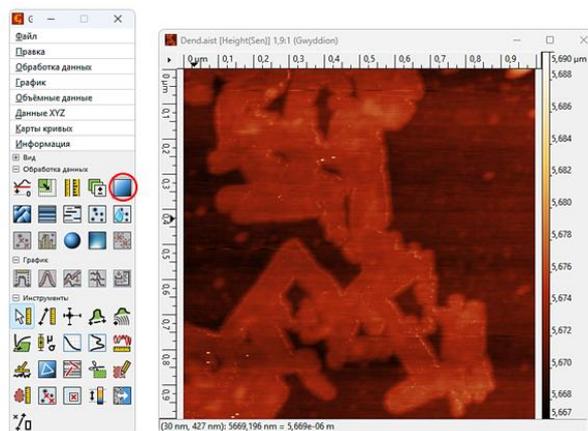


Рисунок 7. – Окно вырывание данных вычитанием средней плоскости изображения

Выравнивание данных с помощью граней (рис. 8).

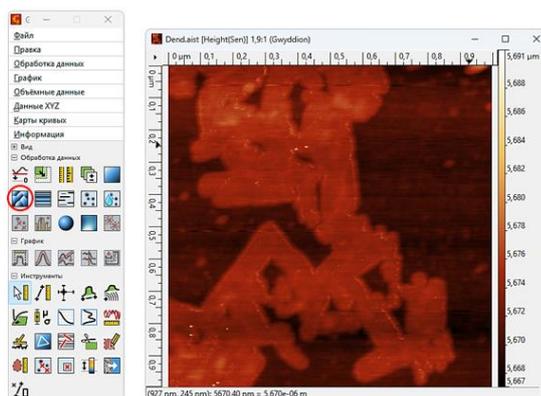


Рисунок 8. – Выравнивание данных с помощью граней

Удаление горизонтальных полос (рис.9)

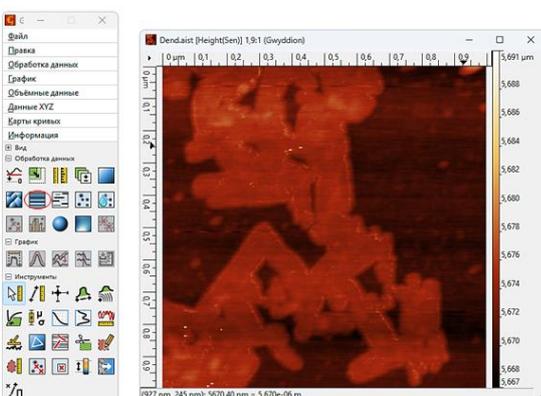


Рисунок 9. – Окно удаление горизонтальных полос

В новом окне выберете математический метод, наиболее подходящий Вашему изображению (рис.10).

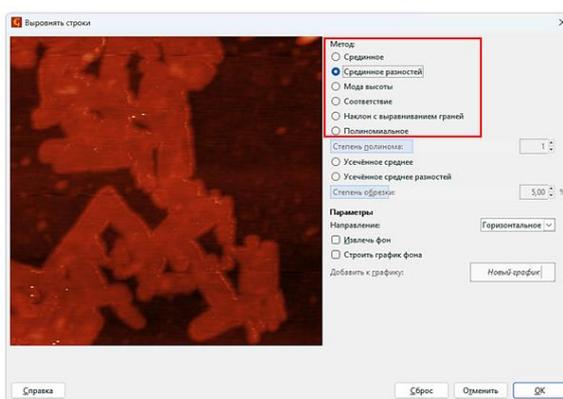


Рисунок 10. – Окно математические методы

Также можно убрать горизонтальные царапины, кликнув несколько раз по соответствующей иконке (рис.11).

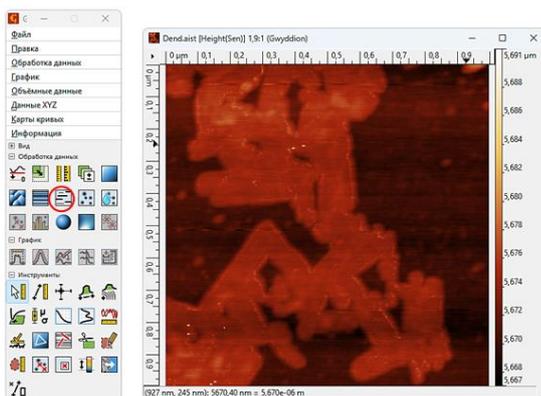


Рисунок 11. – Окно удаления царапин

Построение графиков

7) Для построения различных графических зависимостей необходимо произвести разметку изображения с учетом вертикальной оси. Для этого необходимо обнулить минимальное значение высоты, кликнув по иконке (рис. 12).

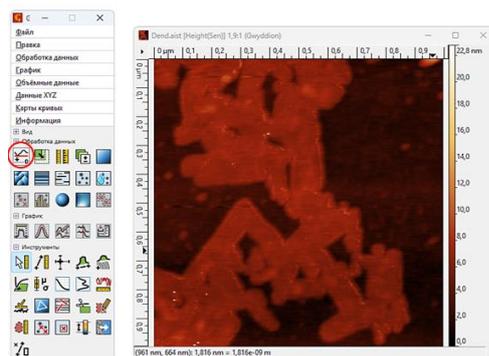


Рисунок 12. – Окно построение графиков

8) После этого необходимо либо пометить зерна по пороговому значению, либо по водоразделу. Чаще используется второй метод (рис. 13).

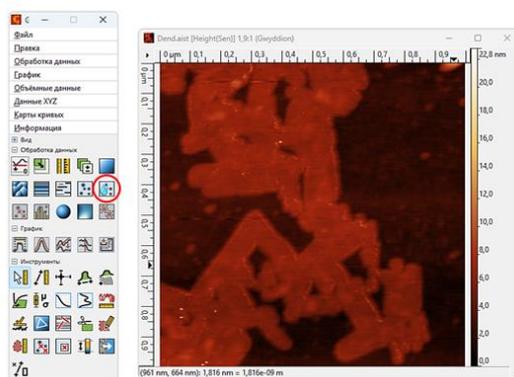


Рисунок 13. – Окно метка зерен по водоразделу

9) В новом окне подберите параметры для построения качественной маски выделения. Нажмите на кнопку *Выполнить* после изменения параметров, чтобы проверить качество рассчитанной программой маски (рис.14).

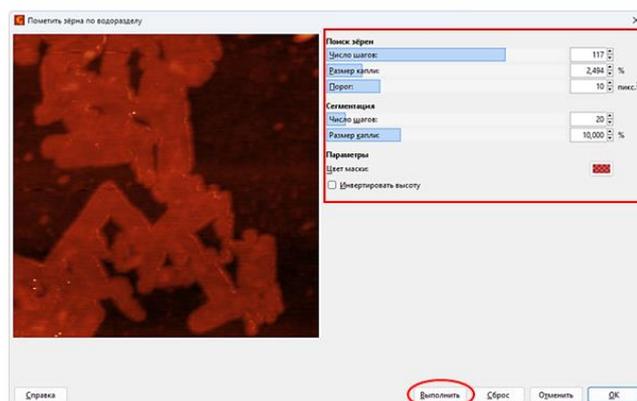


Рисунок 14. – Окно параметры маски

После того как маска станет удовлетворительной нажмите *ОК*, маска отобразится на изображении (рис.15).

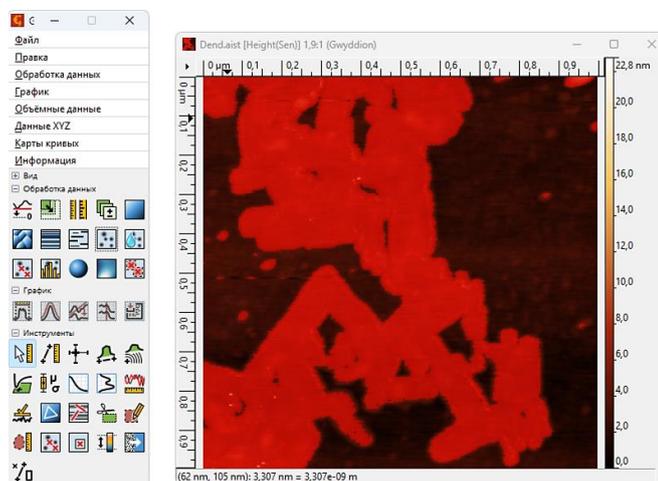


Рисунок 15. – Окно отображение маски на изображении

10) Для построения графиков необходимо воспользоваться командой *Распределение различных характеристик зерна*, кликнув по соответствующей иконке.

11) Меню построения появится в новом окне. Для построения зависимости $N(R)$ выберете в разделе *Площадь*→*Радиус эквивалентного диска*. С помощью пункта *Фиксированное разрешение*, установите необходимое количество точек в графике (рис.16).

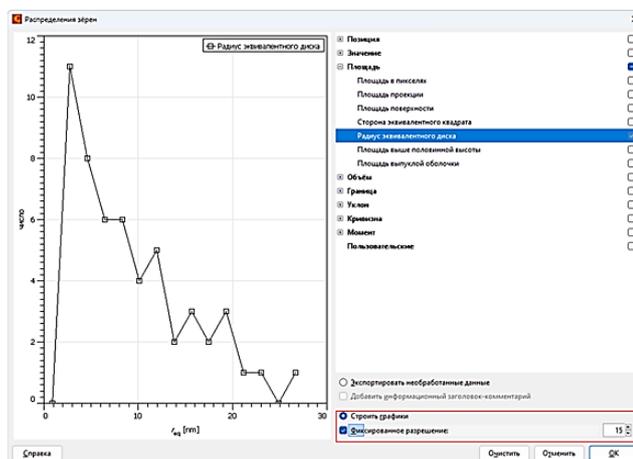


Рисунок 16. – Окно построение графика зависимости $N(R)$

После выбора всех параметров кликните **ОК**, график появится в новом окне.

12) Для экспорта данных графика в текстовом формате выполните команду *График*→*Экспортировать*→*Текст* (рис. 17). В окне выберете следующие параметры.

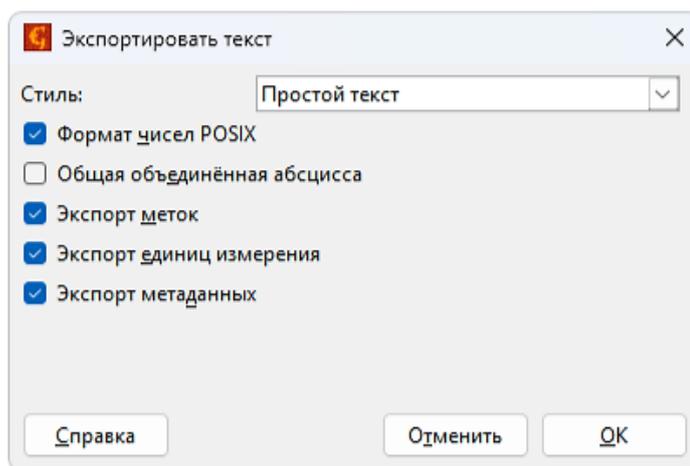


Рисунок 17. – Окно экспорта данных

После нажатия ОК, в меню сохранения выберете папку для сохранения и укажите имя файла, вписав после точки его расширение txt (например, radius.txt), используйте латинские буквы в названии файла.

Этот файл можно открыть в MS Excel или другом ПО для построения графика в виде, пригодном для публикации.

13) Сформулируйте вывод.

Контрольные вопросы:

- 1) Основные возможности ПО Gwyddion?
- 2) Этапы обработки АСМ скан в ПО Gwyddion?
- 3) Этапы построения графиков в ПО Gwyddion?

Рекомендуемая литература:

1. Пул, Ч. Нанотехнологии : учебное пособие / Перевод с английского под ред. Ю. И. Головина. - М. : Техносфера, 2004. - 327 с. - (Мир материалов и технологий). - ISBN 5-94836-021-0 : 219.80 р. - Текст : непосредственный
2. Кузьменко, А. П. Сегнетоэлектрические пленки Ленгмюра-Блоджетт BaTiO_3 : монография / А. П. Кузьменко, И. В. Чухаева, П. В. Абакумов ; Юго-Зап. гос. ун-т. - Курск : Университетская книга, 2020. - 145 с. - Библиогр.: с. 126-144 (178 назв.). - ISBN 978-5-907413-41-2 : 750.00 р., 530.00 р. - Текст : непосредственный. Монография соответствует Государственным образовательным стандартам по направлениям: 28.04.01 - "Нанотехнологии и микросистемная техника".
3. Чухаева, Инна Владимировна (канд. физ.-мат. наук). Формирование пленок методом Ленгмюра-Блоджетт из коллоидной системы $\text{BaTiO}_3/\text{H}_2\text{O}$ и их сегнетоэлектрические свойства : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.07 / И. В. Чухаева ; науч. рук. д-р физ.-мат. наук, проф. А. П. Кузьменко ; Юго-Зап. гос. ун-т. - Курск, 2018. - 162 с. - Библиогр.: с. 143-162. - Текст : непосредственный.
4. Аль Алвани, Аммар Жабер Кадим. Формирование и электронные свойства пленочных структур Ленгмюра-Блоджетт на основе квантовых точек CdSe/CdS/ZnS : специальность 01.04.07 "Физика конденсированного" : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / Аль Алвани Аммар Жабер Кадим ; Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского. - Саратов, 2019. - 163 с. - Библиогр.: с. 137-163. - Текст : непосредственный.
5. Физика тонких пленок. Современное состояние исследований и техническое применение : [сборник статей] / под общ. ред. Дж. Хасса пер с англ. под ред. В. Б. Сандомирского. - Москва : Мир, 1977 - . Т. 7. - 443 с. : ил. - 2.90 р.